

УДК 539.3

**С. Н. ИСАКОВ**, канд. техн. наук, ст. наук. сотр., НТУ «ХПИ»

## ПОСТРОЕНИЕ ТРИБОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ СВАРКИ

Предложен подход к моделированию процесса ультразвуковой сварки на базе трибологической системы, которая определяется как некая логико-математическая структура, элементами которой являются подсистемы материалов, излучения, динамики, внутреннего трения, термодинамики и собственно ультразвукового инструмента. Описано построение отдельных подсистем и формирование в конечном счете существенно нелинейной модели процесса.

**Ключевые слова:** трибологическая система, высокочастотное нагружение, ультразвуковая сварка, нелинейная математическая модель.

**1 Введение.** Ультразвуковая сварка (УЗС) по своей сути является типовым процессом высокоскоростного нагружения, при котором важную роль играют внутреннее и внешнее трение, а при моделировании таких процессов необходимо учитывать нелинейные процессы диффузии, тепло и массопереноса в зоне сварки.

Для моделирования процесса ультразвуковой сварки пластмасс предлагается использовать идеи и методы трибологии, описанные в [1, 2].

Трибологическая система УЗС определяется как логико-математическая структура, элементы которой классифицируются как ее основные подсистемы [3]: подсистема материалов и их свойств, подсистема излучения ультразвука, динамическая подсистема, подсистема внутреннего трения, термодинамическая подсистема и подсистема ультразвукового инструмента (УЗИ), которые во многом базируются на эмпирических и полумэмпирических базах данных.

Схема трибологической системы УЗС представлена на рис. 1, при этом, пунктирная линия разделяет область свариваемых материалов на две характерные зоны. Первая зона характеризует область, в которой происходит процесс изменения структуры материалов, обеспечивающий непосредственно свариваемость деталей, а вторая зона определяет, собственно, границы трибосистемы. Поверхность раздела зон определяется как поверхность, на которой температура материала равна его температуре высокоэластичного состояния  $T_{вэс}$ , которая ниже температуры плавления  $T_{пл}$ , а на границе зоны трибосистемы температура материала постоянна  $T_0$ .

Взаимосвязь подсистем структурированной трибосистемы УЗС приведена на функциональной диаграмме на рис. 2.

## 2 Описание подсистем трибологической системы.

**Подсистема материалов.** Физико-химические характеристики свариваемых

© С. Н. Исаков, 2013

ваемых материалов – плотность, упругость, теплопроводность, вязкость, скорость звука и прочие, - являются определяющими параметрами при моделировании процесса УЗС. При этом в подсистеме материалов все физико-химические характеристики материалов записываются как функции температуры, а формализация этих функций базируется на экспериментальных данных. В принципе для основной массы материалов характерны линейные зависимости соответствующих характеристик от температуры, но, в то же время, конечная математическая модель процесса формирует существенную нелинейность всей модели в целом.

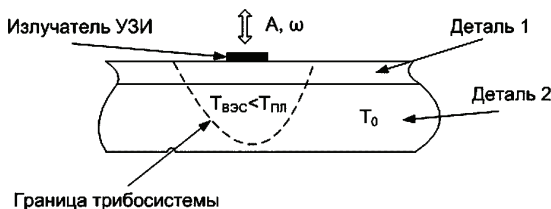


Рисунок 1 – Схема трибологической системы УЗС

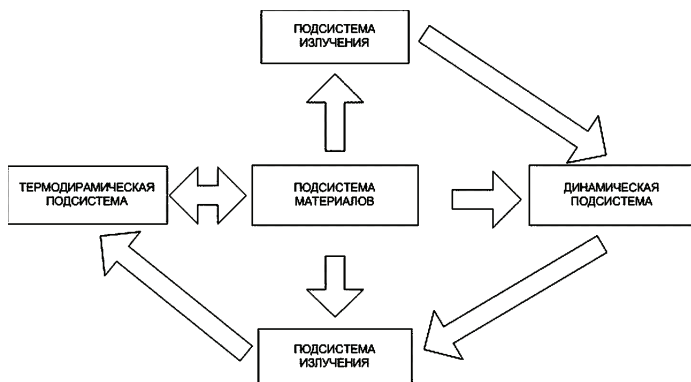


Рисунок 2 – Функциональная диаграмма трибосистемы УЗС

В этой же подсистеме выполняется первоначальное построение зоны трибосистемы и производится ее корректировка по результатам расчетов.

Подсистема излучения УЗ. Ультразвуковое поле, создаваемое технологическим сварочным инструментом, существенным образом зависит от формы рабочего наконечника излучателя, типа его колебаний, частоты и амплитуды его колебаний, а также от параметров среды, в которой ультразвуковое поле распространяется.

Для моделирования процесса излучения в этой подсистеме рабочая поверхность излучателя аппроксимируется излучателями нулевого (пульсирующая сфера или монополь, рис. 3, а) или первого (осциллирующая сфера

или диполь, рис. 3, б) порядка.

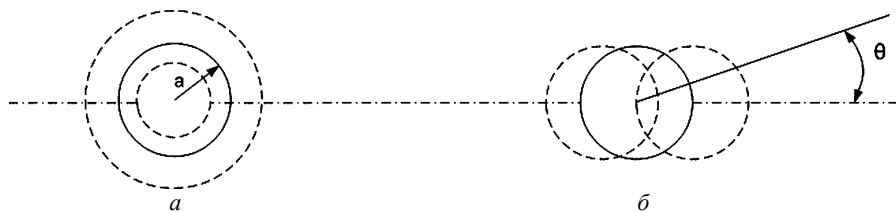


Рисунок 3 – Типы излучателей: а – монополь, б – диполь

Для расчета давления, создаваемого гармоническим излучателем (зависимость от времени  $\exp(i\omega t)$  в однородном полупространстве, используется интегральное соотношение Кирхгофа для потенциала скоростей [4].

В этой подсистеме ультразвуковой сварочный инструмент моделируется набором элементарных излучателей, расположенных на его рабочем торце и работающих синфазно – либо монополями, либо диполями. Интенсивность излучения зависит от амплитуды смещений в центре элементарного излучателя по нормали к поверхности излучателя.

При моделировании излучателя элементарными диполями ось диполя ориентируется по нормали к поверхности излучателя, а подсчет акустического давления производится в плоскости симметрии излучающей системы.

**Динамическая подсистема.** Свариваемые с использованием ультразвука детали из пластмасс, полимеров, некоторых композиционных материалов и прочего, изготавливаются из материалов, которые обладают вязкоупругими и вязкопластическими свойствами и проявляют ряд специфических особенностей, которые необходимо учитывать при моделировании процесса УЗ сварки. Среди таких особенностей - гистерезис деформации при циклическом нагружении и разгрузке, релаксация напряжения при постоянной деформации, ползучесть при постоянном напряжении и т.п. [5].

Моделирование деформирования свариваемых материала можно обеспечить сочетанием простейших структурных элементов, среди которых наиболее часто [6] используются упруго-вязкая модель Максвелла, вязкоупругая модель Кельвина-Фойгта и вязкопластическая модель Бингама, которые с высокой степенью точности отвечают особенностям реальных тел и для различных временных зависимостей напряжения позволяют определить соответствующие временные зависимости для деформаций, т.е. отклик материала на внешнее воздействие.

Дополнительные особенности во все применяемые модели вносит учет температурного поля, который влияет на все параметры используемых моделей в соответствии с данными подсистемы материалов.

**Подсистема трения.** Процессы трения как внешнего (в большей степени применительно к ультразвуковой сварке металлов), так и внутреннего (в

большей степени применительно к ультразвуковой сварке пластмасс) в значительной степени обеспечивают эффективные условия свариваемости деталей в условиях тепло и массопереноса в ограниченной зоне, которые зависят как от объемного распределения внутренних источников энергии, так и от шероховатости, волнистости, микроотклонений и физико-механических свойств (микротвердость и остаточные напряжения) поверхностей деталей, которые свариваются.

Гистерезисные потери в зоне сварки при деформировании материала в следствие воздействия ультразвукового поля приводят к его нагреву до температур, соответствующих вязко-текучему состоянию (аморфные полимеры) или к плавлению кристаллов (частично кристаллические полимеры). При температурах высокоэластичного состояния происходит диффузия отдельных сегментов макромолекул свариваемых полимеров, а в ряде случаев – перемешивание вязко-текучего полимерного материала.

Объемная плотность потерь энергии на внутреннее трение в свариваемых материалах определяется в соответствии с представлением Давиденкова [7], а интенсивность деформаций в каждом элементарном объеме свариваемого материала рассчитывается по данным динамической подсистемы и, в конечном, счете является функцией давления звукового поля, создаваемого набором элементарных излучателей, которые моделируют УЗИ.

**Термодинамическая подсистема.** Потери энергии на внутреннее трение при воздействии ультразвукового поля приводят к локальному разогреву материала, что в свою очередь вызывает изменение физико-химических характеристик свариваемых материалов.

Установившееся распределение поля температур по объему зоны сварки может быть получено из решения уравнения стационарной теплопроводности [8], при этом зависимость коэффициента теплопроводности от температуры определяется данными подсистемы материалов.

**3 Решение трибологической системы.** Определенная выше трибологическая система процесса ультразвуковой сварки пластмасс с учетом формализованных подсистем, входящих в нее, представляет собой существенно нелинейную структуру, для решения которой применяется специализированный итерационный процесс, в котором в качестве критерия сходимости используется или интегральное приращение тепловой энергии по объему трибосистемы, или изменение границы трибосистемы, или какие-то другие показатели.

**4 Выводы.** Предложенный системный подход и синтез элементов трибологической системы ультразвуковой сварки пластмасс позволяет создать эффективную модель, которая адекватно описывает процессы, происходящие в зоне сварки, и обеспечивает широкие возможности при моделировании процесса сварки разнообразных узлов и деталей.

Результаты расчета трибологической системы ультразвуковой сварки

будут использоваться для проектирования ультразвукового инструмента. В дальнейших исследованиях планируется включить подсистему УЗИ в структуру трибологической системы УЗ сварки, а также проанализировать возможности оптимизации структуры трибосистемы в целом и ее отдельных подсистем.

**Список литературы:** 1. Основы трибологии (износ, трение, смазка) / Под. ред. А.В. Чичинадзе. – М.: Машиностроение, 2001. – 663 с. 2. Беркович И.И., Громаковский Д.Г. Трибология. Физические основы, механика и технические приложения : Учебник для вузов / Под ред. Д. Г. Громаковского. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2000. – 268 с. 3. Исаков С. М. Трибосистема в якості моделі УЗ зварювання / С.М. Исаков // MicroCAD-2013: XXI між нар. Наук.-практ. конф. Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я. – Х.: 2013. – Ч. 1. – С. 4. Автономова Л.В., Исаков С.Н. Управление параметрами технологического процесса структурно-связанной акустической системы // Восточно-европейский журнал передовых технологий. –Х.: 2008. – № 1/5 (31-2008). – С. 3-6. 5. Холопов Ю.В. Ультразвуковая сварка пластмасс и металлов. – Л.: Машиностроение, 1988. – 221 с. 6. Горячева И.Г., Добычин М.Н. Контактные задачи в трибологии. – М.: Машиностроение, 1998. – 256 с. 7. Матвеев В. В. Демпфирование колебаний деформируемых тел. – К.: Наукова думка, 1985. – 264 с. 8. Кутателадзе С. С. Основы теории теплообмена. – Изд. 5-е перераб. и доп. – М.: Атомиздат, 1979. – 416 с.

*Поступила в редколлегию 24.10.2013*

УДК 539.1

**Побудова трибологічної системи ультразвукового зварювання / С. М. Ісаков // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Динаміка і міцність машин. – Х.: НТУ «ХПІ», 2013. – № 63 (1036). – С. 55-59. – Бібліогр.: 8 назв.**

Запропоновано підхід до моделювання процесу ультразвукового зварювання на базі трибологічної системи, яка визначається як певна логіко-математична структура, елементами якої є підсистеми матеріалів, випромінювання, динаміки, внутрішнього тертя, термодинаміки і власне ультразвукового інструменту. Описано побудову окремих підсистем і формування в кінцевому рахунку суттєво нелінійної моделі процесу.

**Ключові слова:** трибологічна система, високочастотне навантаження, ультразвукове зварювання, нелінійна математична модель.

An approach to modeling of ultrasonic welding process based on tribo-logical system, which is defined as a kind of logical-mathematical structure whose elements are subsystems materials, radiation, dynamics, internal friction, thermodynamics and proper ultrasonic tool. Describes the construction of the individual subsystems and ultimately the formation of an essentially nonlinear process model.

**Keywords:** tribological system, the high loading, ultrasonic welding, nonlinear mathematical model.